

# 孤立直流微电网运行控制策略

薛贵挺<sup>1</sup>, 张 焰<sup>1</sup>, 祝达康<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市电力公司, 上海 200122)

**摘要:** 以光伏阵列-燃料电池-超级电容所构成的低压单极型直流微电网为研究对象, 在考虑分布式电源特性的基础上, 研究该直流微电网的运行控制策略。采用开路电压比例系数法跟踪光伏阵列的最大功率; 利用斜率限制器控制燃料电池功率的变化速度, 防止“燃料饥饿”, 进而改善燃料电池性能, 提高其使用寿命; 使用滑模控制实现超级电容的快充快放, 稳定直流母线电压。在 MATLAB/Simulink 中搭建系统模型, 仿真结果表明, 所提控制策略可以提高能源利用率, 改善系统的电能质量。

**关键词:** 直流微电网; 光伏阵列; 燃料电池; 超级电容; 变换器; 控制

**中图分类号:** TM 727

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.019

## 0 引言

分布式电源 DGs (Distributed Generations) 由于污染少、安装地点灵活等多方面优点近年来得到快速发展, 但大量 DGs 接入电网也产生了一些不良影响。作为新能源接入的一种解决方案, 21 世纪初提出了微电网概念。微电网分为交流微电网和直流微电网。直流微电网不仅可以方便地接入直流性质的微电源, 如光伏阵列 PVA (Photo Voltaic Array)、燃料电池 FC (Fuel Cell) 和超级电容 SC (Super-Capacitor), 而且可以增大线路传输容量, 提高供电可靠性, 降低系统损耗。直流负荷不断增多, 如电动汽车、电子负荷等, 为直流微电网的应用提供了发展机遇。直流微电网已引起国内外学者及电力工业界的广泛关注。

文献[1-3]讨论了直流配电在商业办公和居民住宅应用的可行性, 认为在有直流微电源接入的情况下, 采用直流可以有效地降低系统损耗。文献[4-5]提出了基于直流模块的建筑集成光伏系统的电气结构, 论述了直流变换器拓扑的设计原则, 研究了光伏直流建筑模块与集中逆变模块的协调控制策略, 但没有涉及多种分布式能源的互补应用。文献[6]探讨了直流微电网的稳定性问题, 重点讨论了变换器控制参数的影响, 但没有计及 DGs 特性。文献[7]建立了光伏阵列和燃料电池的模型, 验证了模型的有效性, 但没有涉及储能装置和微电网能量管理控制策略。文献[8]研究了直流微电网运行模式切换控制策略, 通过控制汽轮机的工作个数维持网内功率平衡, 但没有涉及微电源数学建模。

目前对 DGs 的研究主要在交流微电网下进行, 大多探讨单一类型微电源的并网控制, 含有储能装置的混合发电系统在直流微电网中的研究并不多。本文探讨 DGs 在直流微电网中的应用, 研究考虑

DGs 特性的孤立直流微电网运行控制策略, 在 MATLAB/Simulink 下验证控制策略的有效性。主要内容包括: 建立光伏阵列、燃料电池和超级电容的数学模型; 跟踪光伏阵列最大功率; 对超级电容进行充放电管理, 防止过充或过放, 并维持直流母线电压稳定; 对燃料电池输出功率变化率进行控制, 防止“燃料饥饿”, 保持网内功率平衡; 提出分层控制结构, 建立微电源控制器和中央控制器, 实现微电源间协调控制。

## 1 系统结构

直流微电网主要由微电源、变换器、直流配电网、储能装置和直流负荷组成, 图 1 为本文研究的低压单极型直流微电网结构示意图。光伏阵列是主电源, 发电功率不可控, 输出功率大小与环境密切相关, 如阴雨天和夜晚光伏阵列不输出功率。燃料电池是备用电源, 发电功率不受环境、地理因素的影响, 输出功率可控, 用来提供系统长期功率差额, 保证网内功率平衡, 提高供电可靠性。但燃料电池动态特性慢, 快速的负荷变化会引起“燃料饥饿”而影响燃料电池寿命<sup>[9]</sup>, 因此需和超级电容配合使用。超级电容由于充放电速度快, 当光伏发电量或负荷功率突变时, 可快速补偿瞬时的能量不平衡, 在保护燃料电池的同

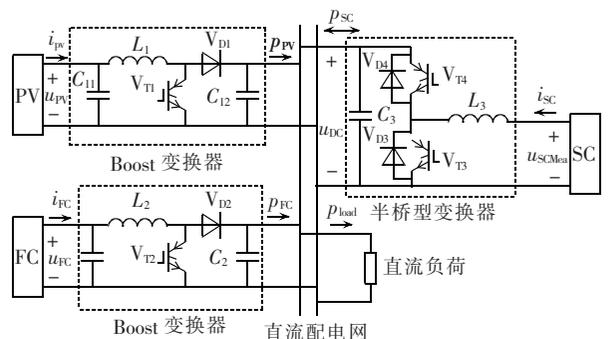


图 1 研究系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of studied system

时维持直流电压稳定。

## 2 微电源模型

### 2.1 光伏阵列模型

单片光伏电池容量小,实际使用时将其串并联组成光伏阵列。光伏电池的模型如图 2 所示,主要由光生电流源、二极管、并联电阻和串联电阻组成。理想模型则不考虑串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_{sh}$  的影响。

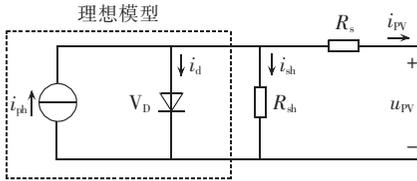


图 2 光伏电池等值电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model of photovoltaic cell

本文采用文献[10]的数学模型,使用厂商提供的参数,包括开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ 、最大功率点电压  $U_m$ 、最大功率点电流  $I_m$ 。

### 2.2 燃料电池模型

根据电解质的不同,燃料电池主要分为质子交换膜燃料电池、碱性燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池。其中,质子交换膜燃料电池效率高、功率密度高、低温启动快,成为后备电源的最佳选择,本文也以此为列。

质子交换膜燃料电池的输出特性经验公式<sup>[7]</sup>是:

$$u_{FC} = E_{Nernst} - U_{act} - U_{ohmic} - U_{con} \quad (1)$$

其中,  $u_{FC}$  是燃料电池的输出电压,  $E_{Nernst}$  是热力学电势,  $U_{act}$  是活化极化电势,  $U_{ohmic}$  是欧姆极化电势,  $U_{con}$  是浓差极化电势。

### 2.3 超级电容模型

超级电容模型主要有德拜极化模型、传输线模型和经典等效模型。图 3(a)为经典等效模型,图中  $R_{ESR}$  是等效串联电阻,代表电容器内部发热所消耗的功率,对电容器的充放电过程影响较大;  $R_{EPR}$  是等效并联电阻,代表超级电容的漏电流,影响电容的长期储能性能;  $C_{SC}$  是理想电容。在实际应用中,电容器通常处于较快和频繁的充放电循环过程,  $R_{EPR}$  的影响可以忽略<sup>[11]</sup>,电容器可进一步简化为一个理想电容与等效电阻串联的模型,如图 3(b)所示。

根据式(2)—(4)确定超级电容的容量  $C_{SC}$ <sup>[12]</sup>:

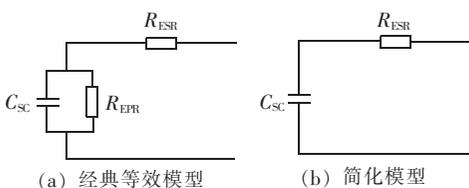


图 3 超级电容等值电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of super-capacitor

$$C_{SC} = \left(1 + \frac{E_{loss}}{P_C t_d}\right) C_{Min} \quad (2)$$

$$C_{Min} = \frac{2 P_C t_d}{U_{SCNom}^2 - U_{SCMin}^2} \quad (3)$$

$$E_{loss} = \int_0^{t_d} i_{SC}^2(\tau) R_{ESR} d\tau = P_C R_{ESR} C_{Min} \ln \frac{U_{SCNom}}{U_{SCMin}} \quad (4)$$

其中,  $E_{loss}$ 、 $P_C$ 、 $t_d$ 、 $U_{SCNom}$ 、 $U_{SCMin}$ 、 $i_{SC}$  和  $C_{Min}$  分别是超级电容的能量损耗、恒定放电功率、放电时间、额定工作电压、最低工作电压、放电电流和最小容量。

## 3 直流微电网控制策略

系统控制目标是跟踪光伏阵列最大功率和稳定直流母线电压,保证直流微电网在负荷波动和光照变化时正常运行。运行限制条件包括:燃料电池输出电流在  $[0, I_{FCN}]$  之间;燃料电池功率变化率在限定值之内;超级电容充放电电流在  $[I_{SCMin}, I_{SCMax}]$  之间;超级电容端电压在  $[U_{SCMin}, U_{SCMax}]$  之间。图 4 为直流微电网的控制示意图。

### 3.1 光伏阵列控制器

为充分利用太阳能,需要对光伏阵列输出功率进行最大功率点跟踪(MPPT)控制。常用的 MPPT 算法有扰动观察法、开路电压比例系数法、短路电流比例系数法、电导增量法等<sup>[13]</sup>。本文采用开路电压比例系数法。

光伏阵列的最大功率点电压  $U_m$  和开路电压  $U_{oc}$  之间存在着近似的线性关系,即:

$$U_m \approx k_1 U_{oc} \quad (5)$$

其中,  $k_1$  为比例常数,取值范围为 0.71~0.78。

假设 Boost 变换器工作在连续电流模式,可得:

$$p_{PV} = i_{PV} u_{DC} (1 - d_1) \quad (6)$$

其中,  $i_{PV}$  是光伏阵列的电流,  $u_{DC}$  是直流母线电压,  $d_1$  是开关管  $V_{T1}$  的瞬时占空比。此外,为提高 Boost 变换器效率,当光照强度大于  $100 \text{ W/m}^2$  时才启动该变换器。

### 3.2 燃料电池控制器

控制燃料电池电流的方法主要有 2 种:直接电流控制法<sup>[14]</sup>和间接电流控制法<sup>[15]</sup>。本文采用直接电流控制法,如图 4 所示。燃料电池作用是补偿长期的能量不平衡,其工作状态取决于超级电容端电压  $u_{SCMea}$ :当  $u_{SCMea}$  低于设定值  $U_1$  时,启动燃料电池;当  $u_{SCMea}$  高于设定值  $U_2$  时,关闭燃料电池。为提高燃料电池使用效率,燃料电池启动后以额定功率运行。燃料电池额定电流  $I_{FCN}$  经斜率限制器后与反馈电流相比,然后将电流偏差信号送入电流控制器产生变换器的触发脉冲。

由状态空间平均法推得燃料电池侧 Boost 变换器传递函数<sup>[16]</sup>为:

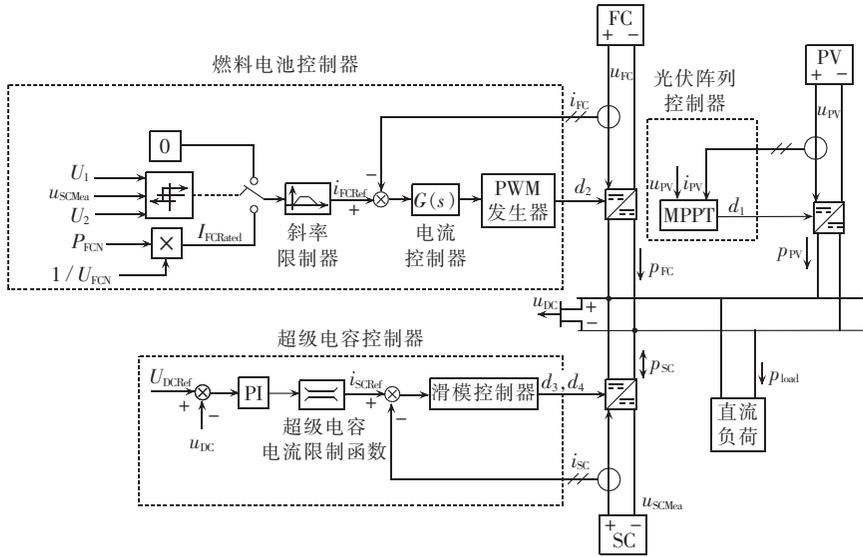


图 4 直流微电网控制策略

Fig.4 Control strategy of DC microgrid

$$\frac{\hat{i}_{FC}(s)}{\hat{d}_2(s)} = \frac{C_2 U_{DCref} s + I_{L0} (1 - D_2)}{L_2 C_2 s^2 + C_2 R_L s + (1 - D_2)^2} \quad (7)$$

其中,  $D_2$  是开关管  $V_{T2}$  的稳态占空比,  $U_{DCref}$  和  $I_{L0}$  分别是直流母线的参考电压和电感  $L_2$  的额定电流,  $R_L$  是电感  $L_2$  的寄生电阻。

PWM 发生器的传递函数为:

$$G_{PWM} = 1/K_{PWM} \quad (8)$$

其中,  $K_{PWM}$  是锯齿载波信号的幅值。

图 4 中电流控制器的传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (9)$$

应用频率响应法设计控制器参数  $K_p$  和  $K_i$ 。

### 3.3 超级电容控制器

超级电容充放电时端电压变化范围大, 实际应用中必须采用 DC/DC 变换器来控制能量的双向流动。本文采用半桥型双向 DC/DC 变换器, 如图 5 所示, 其作用是补偿瞬时的能量不平衡, 进而稳定直流母线电压。开关管  $V_{T3}$  和  $V_{T4}$  互补导通, 以保持电感电流连续。超级电容充电时,  $V_{T4}$ 、 $V_{D3}$  导通, 变换器工作在 Buck 模式; 超级电容放电时,  $V_{T3}$ 、 $V_{D4}$  导通, 变换器工作在 Boost 模式。

约定能量正方向为从低压侧到高压侧方向。以电感电流  $i_{SC}$  和直流母线电压  $u_{DC}$  为状态量, 建立大信

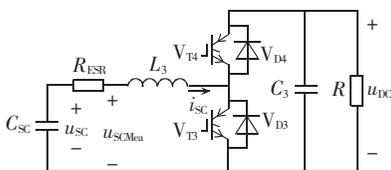


图 5 半桥型双向 DC/DC 变换器拓扑电路

Fig.5 Topological circuit of half-bridge bidirectional DC/DC converter

号统一状态模型<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} L_3 \frac{di_{SC}}{dt} = u_{SC} - R_{ESR} i_{SC} - (1 - d_3) u_{DC} \\ C_3 \frac{du_{DC}}{dt} = -\frac{u_{DC}}{R} + (1 - d_3) i_{SC} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $d_3$  是开关管  $V_{T3}$  的瞬时占空比;  $R$  是等效负载电阻, 定义为输出电压的平方除以输出功率, 是一个变化的可正、可负的量。

为提高系统的响应速度和鲁棒性, 超级电容控制器的电流内环采用滑模控制。根据滑模控制的设计方法, 首先依据状态量设计一个滑模面, 使得状态量在滑模面上能够满足期望的行为; 然后设计控制量, 使得状态量在空间中任意一点可以渐近趋近滑模面。对于半桥型双向 DC/DC 变换器, 可将电流内环的滑模面  $S$  设计如下<sup>[18]</sup>:

$$S = i_{SCref} - i_{SC} \quad (11)$$

对式(11)求导得:

$$\dot{S} = -\dot{i}_{SC} = -\frac{u_{SCMea}}{L_3} + \frac{1 - d_3}{L_3} u_{DC} \quad (12)$$

为使系统稳定, 需要满足滑模面的存在条件:

$$S\dot{S} < 0 \quad (13)$$

按指数趋近律的方法设计控制器<sup>[18-19]</sup>, 有:

$$\dot{S} = -MS - N\text{sgn}(S) \quad (14)$$

其中,  $M > 0, N > 0, \text{sgn}(\cdot)$  表示符号函数。

联立式(12)、(14), 求得控制量  $d_3$  为:

$$d_3 = 1 - \frac{u_{SCMea} - L_3 [MS + N\text{sgn}(S)]}{u_{DC}} \quad (15)$$

根据式(15)设计合适的  $M, N$ , 使得系统输出稳定, 直流电压渐近跟踪给定值。

此外, 为保护超级电容, 使其电流参考值  $i_{SCref}$  在  $[I_{SCmin}, I_{SCmax}]$  之间, 本文采用了超级电容电流限制函数<sup>[14]</sup>, 如图 6 所示, 式(16)是其数学表达式。

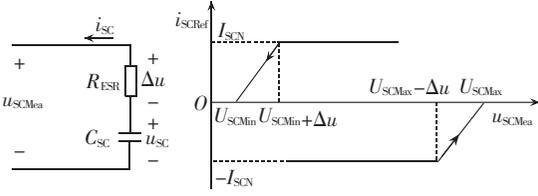


图 6 超级电容电流限制函数

Fig.6 Current limitation function of super-capacitor

$$\begin{cases} I_{SCMin} = -I_{SCN} \min\left(1, \frac{U_{SCMax} - u_{SCMea}}{\Delta u}\right) \\ I_{SCMax} = I_{SCN} \min\left(1, \frac{u_{SCMea} - U_{SCMin}}{\Delta u}\right) \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $I_{SCN}$  是超级电容额定电流,  $u_{sc}$  是理想电容端电压,  $\Delta u$  是超级电容等效电阻上的电压降,  $I_{SCMin}$ 、 $I_{SCMax}$  分别是超级电容放电电流的最小值和最大值。

### 3.4 中央控制器

中央控制器的作用是协调控制光伏阵列与燃料电池形成的发电系统。当负荷功率大于光伏发电量时, 优先考虑超级电容放电以补偿瞬时的能量不平衡。由于超级电容放电, 其端电压不断下降, 当端电压小于设定值  $U_1$  时, 功率管理单元认为此时系统功率缺额是长期的, 指示燃料电池进行辅助发电; 当负荷功率小于光伏发电量时, 超级电容充电, 吸收多余的电能。由于超级电容充电, 其端电压不断上升, 当端电压超过设定值  $U_2$  时, 关闭燃料电池。在超级电容充放电过程中, 为防止超级电容过充(过放), 当端电压大于(小于)上限值  $U_{SCmax}$ (下限值  $U_{SCmin}$ ) 时, 关闭超级电容。图 7 为系统的控制流程图。

## 4 系统仿真

### 4.1 仿真设计

根据图 1 所示结构在 MATLAB/Simulink 下进行仿真, 系统电路参数如下: 光伏阵列 Boost 变换器,  $C_{11}=25 \mu\text{F}$ ,  $L_1=1 \text{ mH}$ ,  $C_{12}=400 \mu\text{F}$ ; 燃料电池 Boost 变

换器,  $L_2=900 \mu\text{H}$ ,  $C_2=400 \mu\text{F}$ ; 半桥型变换器,  $L_3=100 \mu\text{H}$ ,  $C_3=1.5 \text{ mF}$ 。系统仿真时间为 0.8 s, 仿真步长为  $10 \mu\text{s}$ , 开关频率为 20 kHz, 直流母线电压为  $326 \text{ V}^{[1]}$ , 电压允许的波动范围为  $326(1 \pm 5\%) \text{ V}$ 。假定直流负荷峰值为 30 kW, 平均功率为 5 kW, 最大负荷波动为 25 kW。由式(17)计算光伏阵列额定功率为<sup>[20]</sup>:

$$p_{PVN} = \bar{p}_{dem} / k_{cfpv} = 5 / 15\% = 33.3 \text{ (kW)} \quad (17)$$

其中,  $\bar{p}_{dem}$  是负荷平均功率,  $k_{cfpv}$  是光伏阵列的容量因数。为满足在任何天气情况下直流负荷不间断供电的要求, 燃料电池额定功率至少应等于负荷峰值, 本文取燃料电池额定功率为 30 kW。超级电容初始电压及上、下限电压分别为  $U_{SCini}=250 \text{ V}$ 、 $U_{SCmax}=300 \text{ V}$ 、 $U_{SCmin}=150 \text{ V}$ , 额定电流为  $I_{SCN}=200 \text{ A}$ 。为提高系统仿真速度, 反映控制效果, 超级电容的电容量、燃料电池的响应速度、燃料电池的启动电压和关闭电压分别设定为 1.5 F、1 kA/s、240 V 和 260 V。但在实际应用中, 以上参数需结合相应元件的技术资料加以整定。

### 4.2 仿真分析

模拟光伏阵列的 2 种工作环境: 夜晚或阴雨天时, 光伏阵列不工作, 超级电容和燃料电池共同向负荷供电, 超级电容、燃料电池分别提供瞬时、长期功率差额; 晴天时, 光伏阵列工作, 光伏发电量随光照变化而变化, 燃料电池根据超级电容端电压改变工作状态。

图 8—12 分别给出了光照强度、光伏阵列输出功率、直流负荷、超级电容端电压和燃料电池输出功率变化曲线, 具体分析如下。

**a.** 0~0.15 s, 光照强度为  $100 \text{ W/m}^2$ , 光伏阵列不工作,  $p_{PV}=0 \text{ kW}$ ,  $p_{load}=30 \text{ kW}$ , 光伏发电量小于负荷功率。超级电容放电,  $u_{SCMea}$  下降。当  $u_{SCMea} < 240 \text{ V}$  时, 启动燃料电池, 其输出功率按给定斜率增至额定功率。

**b.** 0.15~0.3 s, 光照强度为  $100 \text{ W/m}^2$ , 光伏阵列不工作,  $p_{PV}=0 \text{ kW}$ ,  $p_{load}=5 \text{ kW}$ , 超级电容继续放电,  $u_{SCMea}$  进一步下降。当  $u_{SCMea} < 240 \text{ V}$  时, 启动燃料电

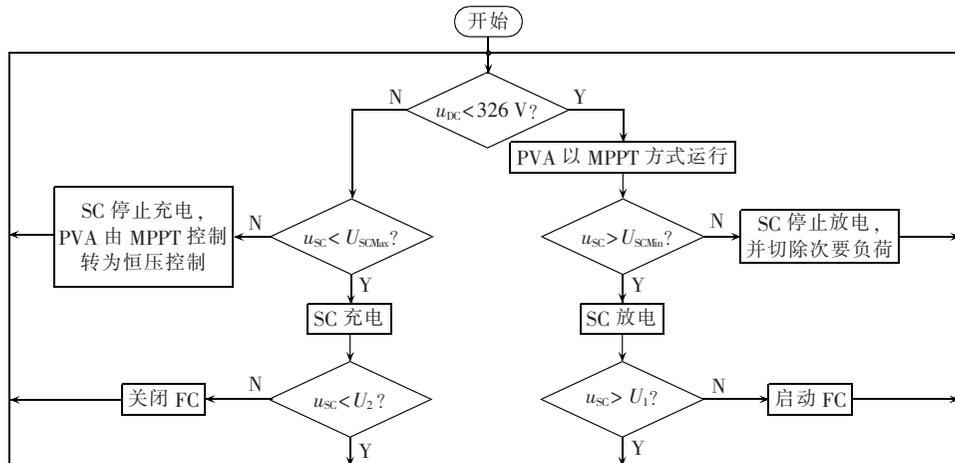


图 7 控制流程图

Fig.7 Flowchart of control

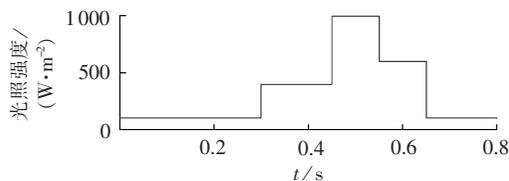


图 8 光照变化

Fig.8 Change of irradiance

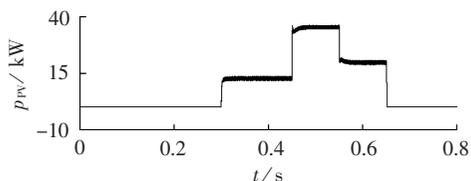


图 9 光伏阵列输出功率

Fig.9 Output power of photovoltaic arrays

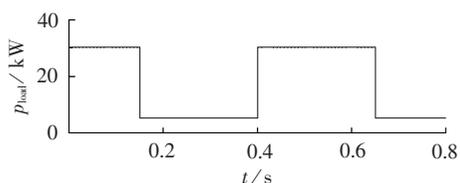


图 10 直流负荷变化

Fig.10 Change of DC load

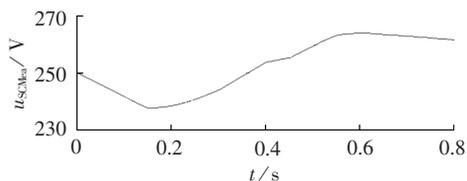


图 11 超级电容端电压

Fig.11 Terminal voltage of super-capacitor

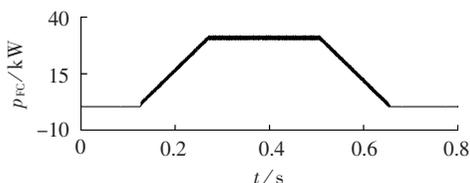


图 12 燃料电池输出功率

Fig.12 Output power of fuel cell

池,  $p_{FC}$  按给定斜率从 0 kW 开始增加, 直到等于 30 kW。在  $p_{FC}$  上升过程中, 发电功率大于负荷需求时, 超级电容由放电状态进入充电状态,  $u_{SCMea}$  开始上升。

**c.** 0.3~0.4 s, 光照强度为  $400 \text{ W/m}^2$ ,  $p_{PV} \approx 12 \text{ kW}$ ,  $p_{load} = 5 \text{ kW}$ ,  $p_{FC} = 30 \text{ kW}$ , 电源发电量大于负荷功率。超级电容充电,  $u_{SCMea}$  上升。

**d.** 0.4~0.45 s, 光照强度为  $400 \text{ W/m}^2$ ,  $p_{PV} \approx 12 \text{ kW}$ ,  $p_{load} = 30 \text{ kW}$ ,  $p_{FC} = 30 \text{ kW}$ , 电源发电量大于负荷功率。超级电容充电,  $u_{SCMea}$  上升。

**e.** 0.45~0.55 s, 光照强度为  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $p_{PV} \approx 33.3 \text{ kW}$ ,  $p_{load} = 30 \text{ kW}$ , 初始时  $p_{FC} = 30 \text{ kW}$ , 发电功率大于负荷需求, 超级电容充电,  $u_{SCMea}$  上升。当  $u_{SCMea} > 260 \text{ V}$ , 关闭燃料电池,  $p_{FC}$  按给定斜率从 30 kW 下降至 0 kW。

**f.** 0.55~0.65 s, 光照强度为  $600 \text{ W/m}^2$ ,  $p_{PV} \approx 19 \text{ kW}$ ,  $p_{load} = 30 \text{ kW}$ , 燃料电池输出功率还在下降过程中。前一阶段, 电源发电量大于负荷功率, 超级电容充电,  $u_{SCMea}$  上升; 后一阶段, 电源发电量小于负荷功率, 超级电容放电,  $u_{SCMea}$  下降。

**g.** 0.65~0.8 s, 光照强度为  $100 \text{ W/m}^2$ , 光伏阵列不工作,  $p_{PV} \approx 0 \text{ kW}$ ,  $p_{load} = 5 \text{ kW}$ ,  $p_{FC} = 0 \text{ kW}$ , 电源发电量小于负荷功率, 超级电容放电,  $u_{SCMea}$  下降。

图 13 是直流母线电压变化曲线。由以上分析可知, 在 0 s、0.15 s、0.4 s、0.65 s 发生了负荷波动, 波动功率最大为 30 kW (0 s); 在 0.3 s、0.45 s、0.55 s、0.65 s 发生了光照突变, 引起了光伏发电量波动, 波动功率最大为 21.3 kW (0.45 s)。从图 13 可以看出, 在上述时刻直流母线的电压变化均在  $\pm 6 \text{ V}$  内, 表明了超级电容控制策略的有效性。

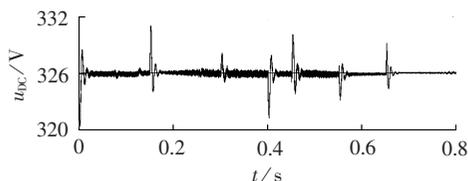


图 13 直流母线电压变化

Fig.13 Change of DC bus voltage

## 5 结论

本文以低压单极型直流微电网为研究对象, 建立了微电源的数学模型, 设计了简单直观的控制策略, 以直流母线电压稳定为控制目标, 实现了微电源间的协调控制。仿真结果表明:

**a.** 光伏阵列采用开路电压比例系数法可以实现 MPPT, 提高了一次能源利用率;

**b.** 燃料电池控制器可以限定功率的变化速度, 避免“燃料饥饿”, 保持网内功率平衡;

**c.** 超级电容控制器能够稳定直流母线电压, 暂态时电压波动在可接受范围内。

## 参考文献:

- [1] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN M H J. Feasibility of a DC network for commercial facilities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1499-1507.
- [2] NILSSON D, SANNINO A. Efficiency analysis of low- and medium-voltage DC distribution systems[C]//Power Engineering Society General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2004: 2315-2321.
- [3] ENGELEN K, LEUNG S E, VERMEYEN P, et al. The feasibility of small-scale residential DC distribution systems[C]//IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Paris, France: IEEE, 2006: 2618-2623.
- [4] 刘邦银, 梁超辉, 段善旭. 直流模块式建筑集成光伏系统的拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 99-104.  
LIU Bangyin, LIANG Chaohui, DUAN Shanxu. Research on topology of DC-module-based building integrated photovoltaic

- system[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(20):99-104.
- [5] 刘邦银,段善旭,胡欢,等. 直流模块化建筑集成光伏系统的协调控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(14):109-114.  
LIU Bangyin,DUAN Shanxu,HU Huan,et al. Coordinate control of DC-module-based building integrated photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(14):109-114.
- [6] 施婕,郑漳华,艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):86-90.  
SHI Jie,ZHENG Zhanghua,AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):86-90.
- [7] 陶琼,吴在军,程军照,等. 含光伏阵列及燃料电池的微网建模与仿真[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):89-93.  
TAO Qiong,WU Zaijun,CHENG Junzhao,et al. Modeling and simulation of microgrid containing photovoltaic array and fuel cell[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):89-93.
- [8] KAKIGANO H,MIURA Y,ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(12):3066-3075.
- [9] TANIGUCHI A,AKITA T,YASUDA K,et al. Analysis of electrocatalyst degradation in PEMFC caused by cell reversal during fuel starvation[J]. Journal of Power Sources,2004,130(1-2):42-49.
- [10] 苏建徽,余世杰,赵为,等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报,2001,22(4):409-412.  
SU Jianhui,YU Shijie,ZHAO Wei,et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2001,22(4):409-412.
- [11] SPYKER R L,NELMS R M. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2000,36(3):829-836.
- [12] THOUNTHONG P,RAEL S,DAVAT B. Analysis of supercapacitor as second source based on fuel cell power generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(1):247-255.
- [13] ESRAM T,CHAPMAN P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(2):439-449.
- [14] THOUNTHONG P,RAEL S,DAVAT B. Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(6):3225-3233.
- [15] 朱选才,徐德鸿,吴屏,等. 燃料电池发电装置能量管理控制系统设计[J]. 中国电机工程学报,2008,28(11):101-106.  
ZHU Xuancai,XU Dehong,WU Ping,et al. Design of energy management control in fuel cell power system[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(11):101-106.
- [16] HAJIZADEH A,GOLKAR M A,FELIACHI A. Voltage control and active power management of hybrid fuel-cell/energy-storage power conversion system under unbalanced voltage sag conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(4):1195-1208.
- [17] 张慧妍. 超级电容器直流储能系统分析与控制技术的研究[D]. 北京:中国科学院电工所,2006.  
ZHANG Huiyan. Research on the analysis and control strategy of ultracapacitor DC storage energy system application[D]. Beijing:Institute of Electrical Engineering,Chinese Academy of Sciences,2006.
- [18] 史君海. 光伏燃料电池混合发电系统控制设计与仿真研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.  
SHI Junhai. Photovoltaic fuel cell hybrid power system control design and simulation research[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2008.
- [19] 熊远生,俞立,徐建明. 基于 $\Sigma$ - $\Delta$ 调制器的Boost变换器的滑模变结构控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):75-78.  
XIONG Yuansheng,YU Li,XU Jianming. Sliding-mode variable-structure control of Boost converter based on  $\Sigma$ - $\Delta$  modulator[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):75-78.
- [20] CAISHENG W,NEHRIR M H. Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(3):957-967.

#### 作者简介:

薛贵挺(1982-),男,湖北襄阳人,博士研究生,主要研究方向为分布式电源并网控制技术、微电网控制技术(E-mail: xueguiting@163.com);

张焯(1958-),女,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性、电力系统安全性;

祝达康(1973-),男,浙江诸暨人,硕士,主要研究方向为电力系统电压稳定、规划、谐波。

## Operational control strategy of stand-alone DC microgrid

XUE Guiting<sup>1</sup>,ZHANG Yan<sup>1</sup>,ZHU Dakang<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company,Shanghai 200122,China)

**Abstract:** A low-voltage unipolar-type DC microgrid composed of PVA(PhotoVoltaic Array),FC(Fuel Cell) and SC(Super-Capacitor) is studied and its operational control strategy considering the characteristics of DGs is researched. The open-circuit-voltage proportional-coefficient method is used to track the maximum power of PVA. The slope limiter is employed to limit the rate of FC power change for preventing the fuel starvation and improving its performance and lifetime. The sliding mode control is applied to SC for its rapid charging and discharging to stabilize the DC bus voltage. A system model is established with MATLAB/Simulink and the simulative results show that,the proposed control strategy increases the energy utilization efficiency and improves the power quality of system.

**Key words:** DC microgrid; photovoltaic array; fuel cells; super-capacitor; electric converters; control